

**А.И.ВОВЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;  
**Н.П.ДИВАК**, аспирант, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **СИНТЕЗ ЕМКОСТНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ПРЕДРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Методом чисельного моделювання з урахуванням передрозрядних процесів проведено дослідження впливу параметрів електродних систем та робочого середовища (води) на вибір параметрів ємнісного енергоджерела ( $L$ ,  $C$ ,  $U_3$ ) високовольтної електротехнологічної установки, яка працює у заданому енергетичному режимі та при мінімумі відносних передпробивних втрат енергії. Виконано аналіз та узагальнення результатів розрахунків.

According to the method of numerical modeling, taking into the account processes preceded a discharge, the investigation of the influence of electrode system parameters and operation surroundings (water) on the choice of capacity power supply parameters ( $L$ ,  $C$ ,  $U_3$ ) of high voltage electrotechnical machine which works in specified energy mode with the minimum of relative energy losses preceded a discharge is made. Analysis and generalization of the calculation results are carried out.

Из всего сложного комплекса явлений, возникающих при электрическом разряде в жидкости, чаще всего в электрогидроимпульсных (ЭГИ) технологиях используется трансформация электрической энергии в энергию ударных волн [1]. Излучаемая быстрорасширяющимся плазменным каналом (поршнем) волна давления используется для различного рода деформаций: разрушения, формообразования и т.д. [2]. Для достижения максимального эффекта воздействия на объект обработки следует обеспечить наиболее оптимальное пространственно-временное распределение воздействия силовых нагрузок на него (волн давления  $P(t)$ ), а значит, и необходимый закон выделения энергии в канале разряда [2], который определяется различными соотношениями внешних регулируемых параметров разрядной цепи  $L$ ,  $C$ ,  $U_3$  ( $L$  – индуктивности,  $C$  – электрической емкости конденсаторной батареи,  $U_3$  – зарядного напряжения емкостного накопителя энергии) и величиной межэлектродного промежутка  $l$  [2]. То есть оптимизация ЭГИ технологического процесса сводится к обеспечению как согласования емкостного энергоисточника с нагрузкой с целью максимального выделения в ней энергии, так и возможности формирования высоковольтной электротехнологической установкой (ВЭУ) заданного распределения давления в зоне объекта обработки.

Распространенным и простым способом, не требующим создания дополнительных устройств, является способ формирования плазменного канала высоковольтным пробоем разрядного промежутка. Под воздействием высо-

кого напряжения, приложенного между положительным и отрицательным электродами, образуется и развивается сеть лидеров. Один из лидеров или серия их замыкает разрядный промежуток. Динамика роста системы лидеров определяет величину предпробивных потерь энергии, которые необходимо учитывать в ЭГИ технологиях. Эти потери зависят от электрических параметров разрядной цепи, геометрии электродной системы ( $r_e$  – радиус закругления стержня положительного электрода,  $l_e$  – длина оголенной части положительного электрода,  $S_e$  – площадь оголенной части положительного электрода,  $l$  – длина межэлектродного промежутка), удельной электропроводности рабочей среды  $\sigma_v$  [1,3-5]. С момента подачи напряжения на электроды и до замыкания межэлектродного промежутка плазменным каналом разряда в разрядной цепи наблюдается рост тока и спад напряжения, то есть происходит отбор энергии, запасенной в конденсаторной батарее. Эта энергия затрачивается на формирование канала разряда – пробой межэлектродного промежутка [4] и должна быть учтена при практическом использовании высоковольтного разряда в качестве источника мощных гидродинамических возмущений в ВЭУ.

В работе [6] представлен подход по оптимизации ЭГИ технологий с использованием решения обратных задач, позволяющий проводить синтез параметров емкостных энергоисточников с учетом нелинейности разрядного канала в зависимости от функции давления в точке рабочей среды. Предложенные в [6] алгоритмы и математические модели позволяют решить задачу по определению параметров емкостного энергоисточника  $L$ ,  $C$ ,  $U_3$  при известной или наперед заданной величине относительных предпробивных потерь энергии  $f$  ( $f$  – доля энергии от запасенной, затрачиваемой на формирование канала разряда), удельной электропроводности рабочей среды, геометрии электродной системы. Показано, что оптимальные параметры емкостного энергоисточника определяются не только требуемым пространственно-временным распределением силовых нагрузок, но и величиной предпробивных потерь энергии (непроизводительные потери).

**Задачи, поставленные в работе.** Учитывая тот факт, что при неудачном сочетании параметров геометрии электродной системы ( $r_e$ ,  $l_e$ ,  $S_e$ ,  $l$ ) и проводимости рабочей среды ( $\sigma_v$ ) величина  $f$  может достигать значения единицы (разряд не завершается пробоем), представляет научный и практический интерес исследование влияния предразрядных процессов на синтез емкостного энергоисточника, обеспечивающего требуемое технологией пространственно-временное распределение давления на объект обработки и определение на этой основе наиболее рациональных сочетаний свойств рабочей среды, геометрии электродной системы и межэлектродного промежутка, обеспечивающие одновременно и минимальные относительные непроизводительные потери энергии.

Для выполнения поставленных в работе задач в качестве исходных дан-

ных для численного моделирования использованы полученные расчетным путем по гидродинамическим характеристикам канала разряда, которые найдены по известной функции давления в точке рабочей среды  $P(t)$  (рис.1) [6], электродинамические характеристики канала разряда (функции протекающего тока  $I(t)$  и электрической мощности, выделяемой на активном сопротивлении канала разряда  $N(t)$ ) (рис. 2).

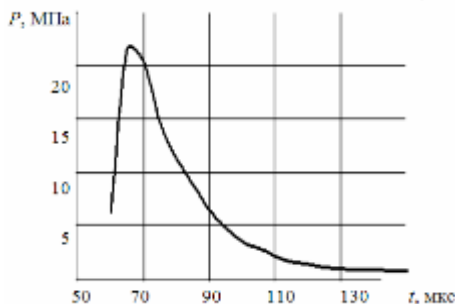


Рисунок 1 – Давление  $P(t)$  в точке среды

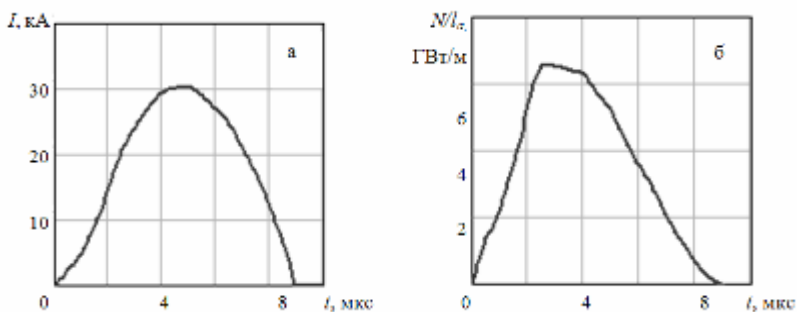


Рисунок 2 – Функции тока  $I(t)$  (а) и удельной на единицу длины канала разряда мощности  $N(t)/l_a$  (б)

По функциям тока  $I(t)$  и удельной на единицу длины канала разряда мощности  $N(t)/l_a$  (рис. 2) определялась величина удельного на единицу длины канала разряда падения напряжения на разрядном промежутке в момент его пробоя  $U_{np}/l_a$  с использованием соотношения, полученного в [6]:

$$\frac{U_{np}}{l_a} = \frac{N_m}{I_m \cdot l_a} \cdot \frac{(0,92 - 0,65 \cdot \eta^2)}{(1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)}}, \quad (1)$$

где  $N_m$  – максимум мощности, Вт;  $I_m$  – максимум тока, А;  $\eta$  – критерий подобия электродинамических характеристик разряда, который характеризует режим разряда, при  $\eta = 1$  разряд – критический; алгоритм определения  $\eta$  пред-

ставлен в [6].

Величина удельного напряжения, рассчитанная по формуле (1) В/м

$$\frac{U_{np}}{l_a} = 1,05 \cdot 10^6. \quad (2)$$

Напряжение на разрядном промежутке в момент его пробоя в зависимости от геометрии электродной системы, удельной электропроводности воды, величины относительных потерь энергии может быть определено из выражения [6]:

$$U_{np} = \sqrt{1-f} \cdot \sqrt{\left((100 \cdot l + 1,25)^2 - 1,25^2\right) \cdot \frac{\sqrt{S_e} \cdot \alpha \cdot \sigma_v}{35,3 \cdot f \cdot C^*} + 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_e \cdot \ln\left(4 \cdot \frac{l}{r_e}\right)}, \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,36 \cdot 10^6$  В<sup>2</sup>·с/м – постоянная;  $C^*$  – величина «удельной» на единицу длины канала разряда электрической емкости конденсаторной батареи, Ф·м, выражения для определения  $C^*$  представлены в [6].

Условие (2) определяет необходимую удельную мощность  $N(t)/l_a$  (рис.2), давление в точке среды  $P(t)$  (рис.1), при различных сочетаниях величин удельной электропроводности воды, межэлектродного промежутка и электродных систем. Однако наибольший практический интерес представляет выбор таких сочетаний вышеперечисленных величин ( $r_e$ ,  $S_e$ ,  $l$ ), которые бы обеспечили минимальную величину относительных предпробивных потерь  $f_{min}$ .

С использованием выражений (2) и (3) исследована зависимость величины относительных предпробивных потерь  $f(l)$  для изменяемой геометрии электродных систем (меняется  $r_e$  и, соответственно, с  $r_e$  изменится  $S_e$ ) (рис.3). При этом удельная электропроводность водопроводной воды принята  $\sigma_v = 0,055$  См/м, характерная для Николаевского региона, а длина оголенной части положительного электрода  $\ell_e = 0,05$  м.

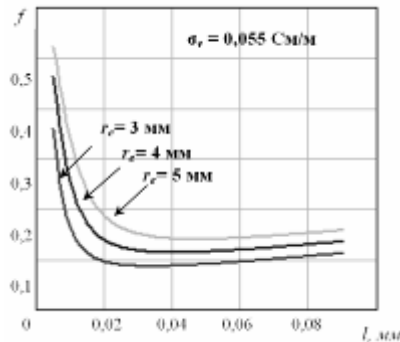


Рисунок 3 – Изменение относительных предпробивных потерь энергии  $f$  от длины разрядного промежутка  $l$  и радиуса закругления электрода  $r_e$

Как следует из рис. 3 функциональные зависимости  $f(l)$  имеют минимумы при различных значениях  $r_e$ . Следовательно, имеется возможность синтез емкостного энергоисточника проводить и с условием минимальных относительных предпробивных потерь энергии  $f_{min}$ . Для примера в табл. 1 представлены расчетные величины параметров емкостного накопителя ( $L$ ,  $C$ ,  $U_3$ ) и соответствующие им величины  $r_e$ ,  $l$ , обеспечивающие заданный импульс давления  $P(t)$  (рис. 1) и  $f_{min}$ . Расчет проводился в соответствии с алгоритмом, изложенным в [6].

Таблица 1 – Параметры энергоисточников высоковольтных электротехнологических установок при различных значениях  $r_e$ , при условии  $f_{min}$

$r_e$ , мм	$l$ , м	$C$ , мкФ	$L$ , мкГн	$U_3$ , кВ	$f_{min}$
3	0,03	1,65	3,86	74,1	0,09
4	0,04	1,37	4,65	90,5	0,11
5	0,05	1,19	5,37	106,2	0,13

Таким образом, формирование заданного импульса давления  $P(t)$  на объекте обработки возможно при наиболее целесообразном сочетании геометрии электродной системы и параметров энергоисточника ВЭУ, которые обеспечат необходимый режим энергоснабжения с минимально возможными относительными предпробивными потерями энергии, то есть будет реализован оптимальный энергетический режим в ЭГИ технологиях.

Формирование электроразрядного канала в воде существенно определяется ее удельной электрической проводимостью [5], которая различна в зависимости от регионов, а также может меняться непосредственно в технологическом процессе по самым различным причинам.

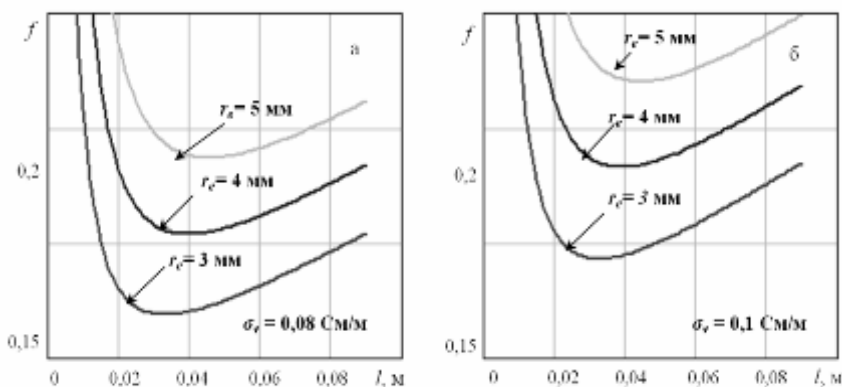


Рисунок 4 – Зависимость величины относительных предпробивных потерь энергии от длины разрядного промежутка при  $\sigma_v = 0,08$  С/м (а) и  $\sigma_v = 0,1$  С/м (б).

Таким образом, для эффективного использования энергии электроразрядных процессов при эксплуатации ВЭУ, а также при определении оптимальных параметров емкостного энергоисточника при  $f_{min}$ , необходимо учитывать и величину удельной электропроводности воды. Исследования влияния  $\sigma_v$  на определение оптимальных параметров емкостного накопителя с использованием выражений (2) и (3) представлены серией функциональных зависимостей  $f(l)$  для различных электродных систем (меняется  $r_e$ ) при  $\sigma_v = 0,08$  См/м и  $\sigma_v = 0,1$  См/м (рис.4).

Полученные функциональные зависимости (рис.4) позволяют выполнить расчет параметров емкостного энергоисточника ВЭУ ( $L$ ,  $C$ ,  $U_3$ ) и выбрать соответствующие длины разрядных промежутков ( $l$ ) (табл. 2) при условии минимальных относительных предпробивных потерь энергии.

Таблица 2 – Оптимальные расчетные параметры емкостного энергоисточника и соответствующие величины  $f_{min}$ ,  $\sigma_v$ ,  $r_e$  и  $l$

$r_e$ , мм	$l$ , м	$C$ , мкФ	$L$ , мкГн	$U_3$ , кВ	$f_{min}$	$N_m/l_a$ , ГВт/ м	$\tau_l$ , мкс	$\eta$
$\sigma_v = 0,055$ См/м								
3	0,034	1,65	3,86	74,1	0,07	6,87	8,82	0,48
4	0,04	1,37	4,65	90,5	0,11			
5	0,047	1,18	5,37	106,2	0,13			
$\sigma_v = 0,08$ См/м								
3	0,033	1,68	3,79	74,09	0,12	6,87	8,82	0,48
4	0,039	1,40	4,53	90,4	0,15			
5	0,045	1,22	5,20	105,8	0,19			
$\sigma_v = 0,1$ См/м								
3	0,033	1,70	3,74	74	0,14	6,87	8,82	0,48
4	0,039	1,43	4,50	90,2	0,18			
5	0,044	1,25	5,08	105,59	0,22			

Для подтверждения достоверности полученных результатов (табл. 2) по рассчитанным параметрам емкостного энергоисточника ВЭУ для каждого случая были также рассчитаны значения критерия подобия электрических характеристик:

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot A \cdot l_a}{U_{np} \sqrt{LC}}}, \quad (4)$$

где  $A = 0,25 \cdot 10^5$  В<sup>2</sup>·с/м<sup>2</sup> – искровая постоянная; длительность первого полупериода тока  $\tau_l$ :

$$\tau_l = \pi \cdot (1 + \eta^3) \sqrt{LC}, \quad (5)$$

а также значение максимальной удельной электрической мощности  $N_m/l_a$  [2]:

$$\frac{N_m}{I_a} = \frac{U_{np}^2}{I_a} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)}. \quad (6)$$

Расчетные величины длительности первого полупериода тока  $\tau_l$ , критерий подобия электрических характеристик  $\eta$  и удельное значение амплитуды электрической мощности  $N_m/I_a$  для всех случаев одинаковы и соответствуют исходным данным, которые представлены на рис. 2, что является подтверждением того, что рассчитанные параметры ВЭУ реализуют один и тот же режим разряда, а следовательно, и  $P(t)$ , при условии минимальных относительных предпробивных потерь энергии.

### Выводы

1. На основе исследований энергетических параметров предразрядных процессов получил дальнейшее развитие подход на базе решения обратных задач по оптимизации ЭГИ технологий, использующих высоковольтный пробой конденсированных сред (воды).
2. Научно обоснована возможность реализации требуемого технологией оптимального импульса  $P(t)$ , воздействующего на объект обработки при условии минимальных относительных предпробивных потерь энергии, при взаимосогласованном выборе параметров емкостного энергоисточника ( $L, C, U_3$ ), электродных систем ( $r_e$ ) и величины межэлектродного промежутка ( $l$ ).
3. Изменение удельной электропроводности воды в процессе эксплуатации ВЭУ в ЭГИ технологиях в пределах (0,055–0,1) См/м не влечет за собой корректировку параметров емкостного энергоисточника (параметры меняются в пределах 10 %, что лежит в рамках расчетной погрешности для инженерных расчетов).

**Список литературы:** 1. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с. 2. Кривицкий Е.В., В.В.Шамко Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – Киев: Наукова думка, 1979. – 208 с. 3. Кужекин И.П. Импульсный пробой и канал разряда в жидкости: Дис. канд. техн. наук. 05.09.05. / Моск. энерг. ин-т. – М., 1967. – 186 с. 4. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. – Киев: Наукова думка, 1983. – 258 с. 5. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 208 с. 6. Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них // Техническая электродинамика. – 2009. – № 6. – С. 54-60.

*Поступила в редакцию 22.03.2010*